



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



***Handreiking
Belasten van de
bodem in een
archeologievriendelijk
bouwplan***

Handreiking Belasten van de bodem in een archeologievriendelijk bouwplan

De Handreiking Belasten van de bodem in een archeologievriendelijk bouwplan beschrijft op welke manieren schade aan het bodemarchief als gevolg van het belasten van de bodem zoveel mogelijk kan worden voorkomen. Geadviseerd wordt deze handreiking in samenhang met de Handreiking Algemene uitgangspunten archeologievriendelijk bouwen te gebruiken.

De bodem kan tijdens het bouwproces op twee manieren worden belast: door het gewicht van een bouwwerk met een fundering op staal of door een ophoging van het maaiveld.

In zijn algemeenheid geldt dat hoe dieper een archeologische vindplaats onder het maaiveld ligt, des te kleiner de zetting en vervorming in de ondergrond door het belasten van de bodem.

Uitgangspunten archeologievriendelijk bouwplan

Bodemingrepen die de archeologische vindplaats raken en verstoren worden zoveel mogelijk voorkomen. Voor alle belastingen van de bodem geldt:

1. Belasten van de bodem is mogelijk bij vindplaatsen die niet zettingsgevoelig zijn.
2. Belasten van de bodem tot 0,8 ton/m² is bij zettingsgevoelige vindplaatsen mogelijk zonder zettingsonderzoek.
3. Voor het belasten van de bodem met meer dan 0,8 ton/m² is bij zettingsgevoelige vindplaatsen bodemonderzoek nodig om te bepalen hoeveel belasting mogelijk is zonder de vindplaats te beschadigen. Dat onderzoek bestaat uit:
 - a. Archeologisch booronderzoek om bodemopbouw, diepteligging en eventuele gelaagdheid van de vindplaats vast te stellen, gevolgd door:
 - b. Zettingsonderzoek om de te verwachten zetting en vervorming te bepalen:
 - i. voor vindplaatsen zonder gelaagdheid of samendrukbare constructies volstaat onderzoek op basis van tabelwaarden of sondeerwaarden.
 - ii. voor vindplaatsen met gelaagdheid of samendrukbare constructies is specialistisch zettingsonderzoek nodig dat gebruik maakt van plaatselijke bodemgegevens, zoals laboratoriumproeven van bodemmonsters.
4. Géén verticale drainage of zandpalen aanbrengen om het zettingsproces te versnellen.
5. Puntbelastingen, horizontale vervorming en verplaatsing van archeologische lagen worden zoveel mogelijk voorkomen.

Beoordeling bouwplan op het aspect belasten van de bodem

In de *Handreiking Algemene uitgangspunten archeologievriendelijk bouwen* wordt beschreven hoe en op welke aspecten een bouwplan kan worden beoordeeld en welke gegevens over de vindplaats en het bouwplan daarvoor nodig zijn.

Ten aanzien van het belasten van de bodem wordt een bouwplan op de volgende criteria beoordeeld:

1. Is de archeologische vindplaats zettingsgevoelig en bedraagt de totale belasting meer dan 0,8 ton/m²? Zo ja:
 - a) Is de volledige belasting noodzakelijk of is een kleinere belasting mogelijk?
 - b) Is de volledige belasting noodzakelijk op de geplande locatie of is op de vindplaats een kleinere belasting mogelijk?
 - c) Is het voorgestelde ophoogmateriaal noodzakelijk of kan het vervangen worden door een lichter materiaal?

Oplossingen

De volgende oplossingen kunnen het bouwplan archeologievriendelijk(er) maken.

Ten aanzien van belasting door ophogen:

1. Minder ophogen

Door minder op te hogen kunnen schadelijke vervormingen in de ondergrond worden beperkt of voorkomen.
2. Lichter ophoogmateriaal gebruiken

Een lichter ophogingspakket veroorzaakt minder vervormingen in de ondergrond. Er zijn diverse lichte ophoogmaterialen beschikbaar.
3. Zettingsneutraal ophogen

Bij deze techniek wordt een deel van de oorspronkelijke grond ontgraven waardoor de bodem minder (door eigen gewicht) wordt belast. Het weggenomen gewicht wordt vervolgens aangevuld door een materiaal dat lichter is dan het weggenomen materiaal, waardoor het maaiveld hoger kan komen te liggen. Deze techniek kan ook worden toegepast om een kleinere toename van de belasting te realiseren (niet 100% neutraal dus). Dat kan een oplossing zijn, zolang de ontgravingen plaatsvinden boven het archeologisch niveau (zie *Handreiking Ontgravingen in een archeologievriendelijk bouwplan*).
4. Over groter oppervlak ophogen

Omdat de sterkste effecten van belasten zich aan de randen van een ophoging voordoen, wordt aangeraden de randen van een ophoging ver buiten een vindplaats te laten vallen, zodat ter plaatse van de vindplaats horizontale vervormingen worden vermeden.
5. De randen van een ophoging aanleggen onder een flauwere helling

Door grondlichamen van een flauwe helling te voorzien aan de randen, worden de zettingsverschillen die optreden, verspreid over een groter oppervlak en dus ook over een grotere afstand. Dit kan vervormingen beperken of voorkomen.
6. Grondmat toepassen

Een grondmat aanbrengen onder een ophoging verandert niets aan de belasting en de zetting, maar zorgt er wel voor dat verschillen in vervormingen in de bodem gelijkmatiger over de ondergrond worden verdeeld. Het verkleint bovendien de kans op bezwijken.

7. Overhoogte toepassen om het zettingsproces te versnellen.
Deze methode bestaat uit het tijdelijk hoger ophogen dan voor het eindresultaat noodzakelijk is om de eindzetting sneller te bereiken. Deze maatregel kan worden toegepast als alternatief voor het aanbrengen van schadelijke verticale drainage en zandpalen, mits de totale ophoging geen schadelijke vervormingen veroorzaakt in de vindplaats.
8. Toepassen van damwanden
Deze techniek is vooral nuttig wanneer náást een archeologische vindplaats een sterke belasting van de bodem plaatsvindt en de effecten daarvan tot in de vindplaats te merken zijn. Een damwand tussen de vindplaats en de ophoging kan de zijwaartse verplaatsingen in de bodem dan opvangen.

Ten aanzien van belasting door een fundering op staal:

1. Lichter bouwen
De belasting van de bodem kan worden verminderd door lichtere bouwmaterialen toe te passen (bijvoorbeeld houtskelbouw of schuimbetonfundering) of door minder bouwmassa te realiseren.
2. Belasting van de fundering spreiden over een groter oppervlak
De schadelijke effecten van belasting kunnen worden verminderd door ze over een groter oppervlak te verdelen. Bij toepassing van een plaatfundering treedt minder zetting en (zettingsverschil) op dan bij een strokenfundering, al kan het verbreden van funderingsstroken ook al deels een oplossing vormen.
3. Funderen op palen
Hoewel palen op zichzelf ook een verstoring van het bodemarchief zijn, biedt een paalfundering uitkomst wanneer de belasting door een fundering op staal schadelijke vervormingen in het archeologisch niveau veroorzaken. Zie hiervoor de *Handreiking Paalfundering in een archeologievriendelijk bouwplan*.

NB

Alle informatie is gebaseerd op de kennis van deze materie medio 2015.

Deze handreiking kan op zichzelf nooit inspelen op bijzondere gevallen en uitzonderingen. Belangrijk is dan ook dat alle betrokken partijen zich realiseren dat er ook andere, niet in deze handreiking benoemde risico's kunnen bestaan die voortvloeien uit het belasten van de bodem in specifieke bouwplannen.

Meer weten?

Er zijn vijf handreikingen over archeologievriendelijke bouwplannen opgesteld:

- > Handreiking Algemene uitgangspunten archeologievriendelijk bouwen
- > Handreiking Ontgravingen in een archeologievriendelijk bouwplan
- > Handreiking Paalfundering in een archeologievriendelijk bouwplan
- > Handreiking Fundering op staal in een archeologievriendelijk bouwplan
- > Handreiking Belasten van de bodem in een archeologievriendelijk bouwplan

Deze handreikingen, een checklist, praktijkvoorbeelden en publicaties zijn opgenomen in de digitale brochure *Handreiking Archeologievriendelijk bouwen*. Alle documenten zijn te vinden op www.archeologiein.nl/bouwen-en-archeologie.

Achtergrondinformatie

De bodem kan op twee manieren worden belast: door het gewicht van een bouwwerk, die via zijn fundering (op staal) de bodem belast of vanwege een ophoging. Ophogingen worden doorgaans aangebracht bij het bouwrijp maken van een terrein en kunnen nuttig zijn als beschermende maatregel voor ondiep gelegen archeologische resten. Zo kan worden voorkomen dat een vindplaats wordt verstoord door graafwerkzaamheden.

Alvorens een terrein te bebouwen, wordt het bijna altijd opgehoogd, in de regel met zand. Ophogingen dienen doorgaans meer doelen, waarvan de belangrijkste zijn:

1. Het spreiden van de druk van de geplande constructie over de ondergrond.
2. Het verbeteren van de grondkwaliteit. Hier gaat het bijvoorbeeld om het verzorgen van een droge ondergrond waaruit water makkelijker wegstroomt, het aanbrengen van een bodem die makkelijk te bewerken is of het verzorgen van een grondwaterpeil dat diep genoeg ligt ten opzichte van de geplande constructies.
3. Het 'op (gelijke) hoogte' brengen van het maaiveld, bijvoorbeeld om wateroverlast van belendende percelen te voorkomen of het afschot van het aansluitende riool te behouden.
4. Het creëren van een zettingsvrije fundering door middel van inzakken. Hierbij zakt een zandlichaam volledig in de slappe bodem – die dus wordt weggedrukt – totdat een vergelijkbaar stabiele laag (meestal een zandlaag) wordt bereikt.

Ophogingen worden vaak afgedekt met gebiedseigen grond ten behoeve van de geplande begroeiing. Als gebiedseigen grond daadwerkelijk afkomstig is van het op te hogen plangebied, betreft het geen extra belasting.

Informatieverlies door het belasten van de bodem

Informatieverlies treedt op als de herkenbaarheid en samenhang van archeologische lagen, objecten en structuren door zetting en vervormingen in de ondergrond (deformatie genoemd) verloren gaat. Het bodemarchief kan daardoor niet of minder goed geïnterpreteerd worden.

Kwetsbaar voor zetting zijn vindplaatsen met samendrukbare archeologische lagen, sporen, vondsten of omvangrijke constructies.

Vooral belasting die ongelijke (differentiële) zetting in de ondergrond veroorzaakt of horizontale vervorming en verplaatsing van archeologische lagen is schadelijk.

Naarmate een zettingsgevoelige vindplaats ondieper onder het maaiveld ligt, neemt de kans op informatieverlies toe.

Vervormingen in de bodem

Wanneer de grond wordt belast, worden de krachten die daarvan het gevolg zijn, via het zogenaamde 'korrelskelet' van de bodem doorgegeven naar de ondergrond. Onder druk 'neemt de pakking toe': het korrelskelet past zich aan de nieuwe situatie aan doordat de korrels dichter naar elkaar toe schuiven. In extreme gevallen breken de korrels en gaat de toename van de pakking daarna nog verder door. De volumevermindering die hiervan het gevolg is, heet 'zetting'. Zetting is heel beperkt omkeerbaar: alleen het laatste beetje zetting wordt door de elasticiteit van de bodem ongedaan gemaakt als een belasting wordt verwijderd. De rest is onomkeerbaar.

Zettingen in de bodem komen overal in Nederland in meer of mindere mate voor. Ook in natuurlijke omstandigheden zet grond, namelijk onder het eigen gewicht. Ophoging en bebouwing versnellen het zettingsproces dus alleen maar. Een ander verschijnsel dat voor zetting kan zorgen, is het lager worden van de grondwaterspiegel. De korrels waaruit de grond bestaat, worden bij peilverlaging niet meer 'gedragen' door de opwaartse druk van het water en de druk in het korrelskelet neemt daardoor toe, met zetting als gevolg. Ook dit proces is onomkeerbaar.

Verschillende grondsoorten reageren verschillend op belasting. Zand vertoont in de regel heel minimale zettingen, vooral als het 'goed gepakt' is, dat wil zeggen dat de korrels dicht op elkaar zitten. Slappe klei en veen zijn zettingsgevoeliger. Grond die al eens eerder is belast, is al samengedrukt en zet bij een volgende belasting minder en minder snel. Alleen wanneer de belasting groter wordt dan het gewicht van de belasting die de grond in het verleden al eens heeft gehad, gaat de zetting weer sneller. Wordt grond in dergelijke gevallen belast met een gewicht dat langzaam toeneemt, dan vertoont de grafiek van de zettingssnelheid een opvallende knik op het punt waar de zettingssnelheid ineens toeneemt. Aan de hand van dat punt kan worden berekend met hoeveel de grond in het verleden ooit belast is geweest. Grond heeft voor belasting dus een soort 'geheugen'. Aan de hand van een samendrukingsproef kan het gedrag van grond onder belasting worden berekend en kan de grootte van een eerdere belasting worden gemeten.

Technieken om consolidatiefase te bekorten

Een van de belangrijkste gevolgen van zetting is het kleiner worden van de ruimte tussen de korrels. Onder grondwater is dan ook het eerste proces dat meetbaar is, het wegdrukken

van het water uit die ruimten. De fase waarin vooral het water wordt weggeperst heet 'consolidatiefase'. Vervormingen in de bodem gaan na de consolidatiefase – in een wat lager tempo – door en kennen in principe geen einde, al wordt de hoeveelheid zetting wel steeds kleiner. In de praktijk wordt bij bouwprojecten uitgegaan van het bereiken van de eindzetting na 27 jaar. Tijdens de consolidatiefase is de grond niet 100% stabiel: een vloeistof is immers niet samendrukbaar en het risico bestaat dat bij een te snelle stijging van het gewicht de belasting van het korrelskelet tijdelijk wordt 'overgenomen' door grondwater dat niet snel genoeg weg kan. De bodem is dan technisch gezien veranderd in een vloeistof en kan 'bezwijken'. Daarbij kunnen hele moten grond verschuiven, een verschijnsel dat meestal ook voor bouwers hoogst ongewenst is.

Vooral in bodems die water slecht doorlaten – klei bijvoorbeeld – is dat een risico, en in dergelijke bodems duurt de consolidatiefase dan ook lang. Bouwen op een ophoogpakket waaronder de bodem nog vroeg in de consolidatiefase verkeert, is dus nogal risicovol. Dat is de reden dat ophogingen vaak lang voordat met de bouwwerkzaamheden wordt begonnen, zijn aangelegd.

Om de consolidatiefase te bekorten, moet de afvoer van water uit de onder de ophoging liggende bodem worden versneld. Dat kan door de weg die het water door het slecht doorlatende sediment moet afleggen te bekorten. Daarvoor bestaat een aantal technieken, die allemaal de grond plaatselijk roeren. Verticale drainage is de meest gebruikte techniek. Hierbij worden voorafgaand aan de ophoging in de bodem op regelmatige afstanden plastic strips ingedrukt. Die lijken nog het meest op een platgeslagen brandweerslang. Via deze afvoeren kan het water sneller weg en kan eerder worden begonnen met de bouw. De onderlinge afstand varieert en kan in sommige gevallen 0,5 m bedragen. Bij dergelijke kleine afstanden is de verstoring bijzonder groot. Verticale drainage blijft doorgaans in de bodem zitten. Het kan in elk geval niet worden verwijderd zonder extra bodemverstoring, maar als ze blijven zitten, wordt toekomstig onderzoek ernstig bemoeilijkt. In plaats van verticale drainage worden ook wel 'zandpalen' gebruikt. Daarbij worden op regelmatige afstanden grote gaten geboord en gevuld met zand. Via die zandkolommen kan water uit de bodem sneller weg. Een techniek die in combinatie met drainage kan worden gebruikt, is consolidatie onder vacuüm, waarbij in de bodem onderdruk wordt gecreëerd, waardoor het water wordt 'weggezogen'.

Wanneer verticale drainage en zandpalen niet zijn toegestaan, is het goed om dat in een heel vroeg stadium aan de bouwers te laten weten, omdat dit grote gevolgen heeft voor de planning van de bouw.

Soms kan de consolidatiefase worden bekort door de ophoging tijdelijk hoger te maken dan voor de bouw nodig is, de zogenaamde 'overhoogte'. Dit is de enige techniek die geen ingrepen in de oorspronkelijke bodem hoeft te vergen (al gebeurt dat in de praktijk wél vaak: meestal worden overhoogte en drainage in combinatie toegepast).

Er bestaan vele vormen van het van elkaar afschermen van grondlagen. Dat kan met (licht) worteldoek, maar ook met zwaardere doek- of matachtig materiaal. Zwaardere vormen zijn bedoeld om ingravingen te voorkomen en om moten grond te verstevigen en bij elkaar te houden ('gewapende grond'). Deze materialen worden doorgaans samengevat met de term 'geotextiel' en worden ook wel 'grondmat' genoemd. Een grondmat onder een ophoging verandert niets aan de belasting en de zetting, maar kan er wel voor zorgen dat verschillen in vervormingen in de bodem binnen een vindplaats gelijkmatiger over de ondergrond worden verdeeld. Het verkleint bovendien de kans op bezwijken.

Ophoog- en funderingsmaterialen

Zand is het standaard ophoogmateriaal, maar er zijn diverse alternatieven wanneer een constructeur een lagere belasting wil realiseren bij een gelijkblijvende ophoging (of een hogere ophoging bij gelijkblijvende belasting). Van zwaar naar licht gaat het om de volgende materialen.

- > Zand
 - Het normaal gebruikte ophoogmateriaal is zand (verweerd gesteente in korrelvorm; 63 µ-2 mm), dat circa 1,6 ton per kubieke meter weegt. Iets lichtere vormen bestaan in de vorm van betongranulaat (1,5 ton) en Eifellava (1,45 ton).
- > Grond
 - Het gewicht van grond (een mengsel van anorganische en organische vaste stoffen in korrelvorm, vloeistoffen en gassen) varieert tussen de 1,4 en 1,6 ton per kubieke meter.
- > Bims (vulkanisch zand)
 - Het tijdens een vulkaanuitbarsting vrijgekomen materiaal bestaat vaak uit vulkanisch glas met belletjes erin, die tijdens het uitwerpen worden gevormd door hete, expanderende gassen. Zo ontstaat bijvoorbeeld puimsteen. De zandvorm hiervan levert een licht ophoogmateriaal op dat slechts 0,68 tot 0,85 ton per kubieke meter weegt. Het bestaat, afhankelijk van de herkomst, in vele vormen en onder diverse (handels)namen: Liparizand, Yalibims en Flugsand zijn enkele voorbeelden.

- > Argex (*Argile Expandé*, geëxpandeerde kleikorrels)
Op een bepaalde manier gebakken, kunnen kleikorrels worden gemaakt die heel licht zijn: Argex. Het materiaal weegt ongeveer 0,65 tot 0,75 ton per kubieke meter. De rode korrels zijn het bekendst van kantoorplantenbakken. Ze zijn wat minder geschikt voor gebieden waar later nog gegraven wordt omdat het materiaal lastig wegscheept. Argex-zand, dat dit nadeel niet heeft, weegt circa 0,63 ton per kubieke meter.
- > Schuimbeton
Een heel poreuze vorm van beton (een mengsel van cement, fijn zand en water waaraan een schuimmiddel is toegevoegd), die minder belasting kan hebben als gewoon beton. Het weegt 0,4 tot 1,8 ton per kubieke meter, afhankelijk van de hoeveelheid luchtballen. Het verhardt en vormt een voor water afdekkende laag over de onderliggende bodem. Naast lichtgewicht ophoog- en funderingsmateriaal wordt het gebruikt om vloeren te isoleren voor vocht en warmte. Het vereiste gewicht hangt af van de toepassing en de vraag of het materiaal zwaarder of lichter dan (grond)water moet zijn.
- > EPS (geëxpandeerd polystyreen, piepschuim, Isomo, Tempex, Styropor, Depron)
Dit lichtste materiaal wordt gemaakt door polystyreen (een keten van aardolieproduct ethenylbenzeen, C8H8) te expanderen met gas. Het bestaat voor circa 2% uit polystyreen en de rest is gas in microscopisch kleine belletjes. Daardoor weegt het slechts 0,015 tot 0,04 ton per kubieke meter, dat is zelfs lichter dan veen. Het kan opmerkelijk hoge druksterkten weerstaan (tot 7500 kg/m², afhankelijk van de gebruikte kwaliteitsklasse). Het kan daardoor ook als funderingsmateriaal gebruikt worden. EPS is een aardolieproduct en lost dus ook op in aardolieproducten. Daarom moet het worden ingepakt onder constructies waarin aardolieproducten worden gebruikt, benzinstations bijvoorbeeld.

Onderstaande tabel vat een en ander samen:

Materiaal	Gewicht per m ³	Voordelen	Nadelen
Zand	1600 kg	goedkoop	zwaar
Grond	1400-1600 kg	goedkoop tot gratis, bij lokaal hergebruik gewichtsneutraal	zwaar
Bims	680-850 kg	half zo zwaar, gedraagt zich als zand	duurder
Argex	650-750 kg	half zo zwaar	niet makkelijk weg te scheppen
Argex-zand	630 kg	licht, gedraagt zich als zand	
Schuimbeton	400-1800 kg	lichter, ook geschikt als funderingsmateriaal	
EPS	15-40 kg	lichtst, ook geschikt als funderingsmateriaal	duur, lost op in aardolieproducten

Effecten van belastingen

Er bestaat niet één vaste waarde voor wat een acceptabele hoeveelheid vervorming is. Daarvoor zijn de verschillen in bodemeigenschappen en typen vindplaatsen te groot. Wel zijn deskundigen het erover eens dat gelijkmatige vervormingen in de bodem in uitsluitend verticale richting veel minder schadelijk zijn dan vervormingen in horizontale richting. Die laatste verstoren de gelaagdheid van een vindplaats.

Midden onder een belasting vindt verticale zetting plaats, wat inhoudt dat de bodem wordt samengedrukt (compacteert). De gronddruk neemt toe, alle onderdelen (korrels, losse voorwerpen, kabels en leidingen) bewegen neerwaarts en bodemlagen worden dunner. Toename van de gronddruk is alzijdig, dat wil zeggen dat de druk in alle richtingen toeneemt en de op archeologisch vondstmateriaal uitgeoefende krachten per saldo dus nul zijn. Aan de randen van een belasting en bij een niet gelijkmatig gevormde zettingsvrije of zettingsarme bodemlaag in de ondergrond – afgedekte Oude Duinen bijvoorbeeld – kunnen verticale bewegingen in de bodem resulteren in zijwaartse bewegingen in de bodem. Die hebben meer effect op het bodemarchief. Vondstmateriaal kan zijwaarts verplaatsen, mét zijn context. Naarmate het materiaal groter is, is de kans groter dat ook breuk optreedt.

Het belangrijkste effect van zettingsverschillen binnen één vindplaats is echter vervorming van de gelaagdheid, de zogenaamde stratigrafie van een vindplaats. Dit effect heeft verstrekkender gevolgen naarmate de stratigrafie fijner is. Ook bij een gelijkmatig verspreide belasting kan dit effect optreden, bijvoorbeeld bij een onregelmatige zettingsarme ondergrond of sterke verschillen in zettingsgevoeligheid van bepaalde bodemlagen. Omdat de stratigrafie samenhangt met de geschiedenis van de vindplaats kan een verstoring van de stratigrafie zorgen voor een groot verlies aan informatie.

Aan de randen van een ophoging kan de bodem bij een te snelle toename van de belasting bezwijken. Dit is normaal gesproken ook vanuit civieltechnisch oogpunt heel ongewenst. Doorgaans zal met dit risico dus al in de bouw- en aanlegplannen rekening gehouden zijn. Doet het zich toch voor, dan zijn de gevolgen te vergelijken met horizontale vervormingen, alleen veel erger. Meest schadelijk voor het bodemarchief zijn ophogingen die zijn bedoeld om volledig in te zakken en de onderliggende bodem weg te drukken, die men dus met opzet laat bezwijken. Hier is sprake van een volledige verstoring van het bodemarchief. De vindplaats kan in zo'n geval alleen door een opgraving voorafgaand aan de werkzaamheden gered worden. Verticale drainage en zandpalen veroorzaken, al dan niet in combinatie met consolidatie onder vacuüm, altijd een meer of minder grote verstoring van de vindplaats. Dat is afhankelijk van de dikte van de zandpalen en de drainage en van hun onderlinge afstand. Alleen aanbrengen van overhoogte (dus niet in combinatie met verticale drainage of zandpalen) heeft dit nadeel niet.

Zettingsonderzoek: metingen, berekeningen en modelleringen

De meeste bodems in Nederland (natte veenbodems uitgezonderd) zijn door natuurlijke rijping en langdurig grondgebruik al enigszins gezet. De praktijk wijst uit dat een ophoging van het maaiveld met 50 cm grond (ca. 0,8 ton/m²) slechts geringe zetting in de ondergrond veroorzaakt. Daarom is het niet zinvol het effect van zetting op een archeologische vindplaats te onderzoeken voor belastingen tot 0,8 ton/m². Dit komt overeen met een ophoging met 50 cm zand; bij een combinatie van ophoging en een fundering op staal is uiteraard minder ophoging mogelijk.

Vervormingen in de ondergrond kunnen op allerlei manieren worden berekend. De meest eenvoudige manier zijn formules die de verticale zetting uitrekenen en formules waarmee op basis daarvan de horizontale vervormingen kunnen worden geschat. Een volledige modellering van een doorlopend bodemprofiel is ook mogelijk. Daarvoor zijn computerprogramma's nodig die de bodem behandelen als een grote verzameling cellen ('eindige elementenmethode') die gezamenlijk de opbouw van de bodem modelleren (MSettle of Plaxis bv.). De computerprogramma's zijn niet noodzakelijk preciezer dan de formules, maar kunnen wel andere vragen beantwoorden, bijvoorbeeld die naar zettingsverschillen en vooral horizontale vervormingen.

Belangrijker dan de vraag welke modelleringsmethode gebruikt wordt, is de input. Alle zettingsberekeningen hebben empirische

variabelen nodig die het gedrag van de bodem beschrijven. Die kunnen op drie manieren worden verkregen:

1. Tabelwaarden, op basis van de lithologie (zand, klei, veen, zandige klei e.d.: tabel 2.b NEN 9997-1, gebaseerd op tabel 1 van NEN 6740 bijvoorbeeld).
2. Afgeleid van conusweerstand- en wrijvingsweerstandswaarden op basis van sonderingsonderzoek ter plaatse.
3. Laboratoriumonderzoek aan bodemonsters die ter plaatse genomen zijn (samendrukkingsproeven bijvoorbeeld).

Van boven naar beneden is sprake van empirische variabelen die op een steeds directere manier aan de plaatselijke bodem zijn ontleend. Naarmate waarden worden gebruikt die directer aan de plaatselijke bodem gemeten zijn, zijn de zettingsberekeningen nauwkeuriger. Zo is bekend dat tabelwaarden kunnen leiden tot berekeningen met een (onnauwkeurigheds)marge tot 30%, ongeacht welke methode van rekenen je gebruikt. Een dergelijke marge is niet altijd toereikend voor archeologische vragen. Dat houdt niet in dat voor archeologische doeleinden per se altijd het meest uitgebreide laboratoriumonderzoek gedaan moet worden om de vereiste nauwkeurigheid te bereiken.

Minder nauwkeurige schattingen kunnen vaak al antwoord geven op de relevante vragen, bijvoorbeeld als blijkt dat de vervormingen in de bodem met zekerheid veel te groot zullen worden, of juist verwaarloosbaar klein. Van belang is dat het zettingsonderzoek geschikt en voldoende nauwkeurig is voor het beoogde doel: bepalen hoeveel vervorming plaatsvindt in de archeologisch relevante laag of lagen. De vereiste nauwkeurigheid vloeit vooral voort uit de vindplaatskenmerken: een vindplaats met een fijne stratigrafie van lagen op centimeter-schaal zal ook een nauwkeurigheid op centimeterschaal vergen. Uit het bovenstaande blijkt wel dat het voorspellen van zettingen en vervormingen lastig is en dat de uitkomsten van berekeningen marges hebben. Als er onzekerheid bestaat over de te verwachten zetting, wordt geadviseerd de feitelijk op te treden zetting te monitoren, bijvoorbeeld door middel van zandbakens.

© Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, 2016
Beeldverantwoording: Henk Roolvink, beeldbank RWS

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Postbus 1600
3800 BP Amersfoort
www.cultureelerfgoed.nl