Gemeente Amsterdam

Bezoekadres
Weesperstraat 430
1018 DN Amsterdam

Postbus 12693
1100 AR Amsterdam
Telefoon 14 020
amsterdam.nl/ingenieursbureau

Notitie

Aan	PBK
Van	5.1, 2, e @amsterdam.nl
Kopie	5.1, 2, e @waternet.nl 5.1, 2, e @waternet.nl 5.1, 2, e @amsterdam.nl
Datum	5 juni 2025
Ons kenmerk	2025-1000772

Onderwerp Rekenmethode geohydrologische kadeweerstand

Opsteller	Collegiale toets	5.1, 2, e	Datum
5.1, 2, e	5.1, 2, e	digitaal	05-06-2025

1. Inleiding

De gemeente Amsterdam werkt middels het Programma Bruggen en Kademuren (PBK) aan de vervanging en renovatie van kademuren in de binnenstad. Het grachtenstelsel heeft een belangrijke rol in de beheersing van de grondwaterstand. Door de kademuur vindt uitwisseling plaats tussen het gracht- en grondwater. Te hoge grondwaterstanden kunnen leiden tot grondwateroverlast, zoals vochtige kelders, optrekkend vocht en verminderde boomgroeiruimte. Te lage grondwaterstanden kunnen leiden tot droogval en rotting van houten funderingspalen. Het is daarom belangrijk dat de nieuwe kademuur voldoende grondwaterdoorlatend is en niet leidt tot verslechtering van de grondwatersituatie.

In opdracht van de gemeente Amsterdam en Waternet doet Deltares onderzoek naar de grondwaterdoorlatendheid van de kademuren. Onderdeel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een rekenmethode om de weerstand van de kademuur te berekenen. De methode kan worden gebruikt door aannemers/ontwerpers. De methode kan door de opdrachtgever worden gebruikt om door aannemers gerapporteerde weerstanden te verifiëren/toetsen. Dit betreft de weerstand van de kademuur tegen grondwaterstroming. Deze weerstand wordt uitgedrukt in dagen (d).

Uitgebreide toelichting en achtergrond van deze verificatiemethode is te vinden in de rapportage van Deltares:. "*Waterdoorlatendheid kademuren – verificatiemethoden, 20-01-2025, 11208370-002-BGS-0006 (conceptversie)*". In deze notitie zijn de opzet en uitgangspunten van deze verificatiemethode omgeschreven.

Deze notitie is opgesteld door geohydrologen van het IB (gemeente Amsterdam) en Waternet. Het doel van deze notitie is het communiceren van de rekenmethode. Zodat externe partijen deze verificatiemethode kunnen toepassen bij de toetsing van nieuwe kademuurontwerpen.

2. Opzet verificatiemethode

De berekeningen moeten uitgevoerd worden met een 3D-grondwatermodelleringssoftware. Deltares heeft hiervoor FlexPDE gebruikt. Het voordeel van deze software is dat er lokaal zeer fijne celdiscretisatie (horizontaal en verticaal) mogelijk is. Modelleringssoftware zoals Modflow is ook toepasbaar.

Tabel 1 Uitgangspunten weerstandberekening

Onderdeel	Omschrijving
Modelbreedte (parallel aan kademuur)	Afhankelijk van het repetitieve karakter van de doorlatendheidsoplossing. Bv. Bij een oplossing het gaten HOH 3 m volstaat een model met breedte van 3 m. Het gat dient in het midden van het model te zitten.
Modellengte (haaks op de kademuur)	Afstand tussen gracht en de rooilijn van de woningen (ca. 10 m, maar locatieafhankelijk)
Modelhoogte	Bovenkant: NAP -0,4 m (grachtpeil) Onderkant: onderkant antropogene deklaag.
Discretisatie	Afhankelijk van kadeontwerp. De celgrootte dient vooral in de omgeving van de perforaties waar uitstroom plaatsvindt naar de gracht dusdanig fijn te zijn dat verdere verfijning geen invloed meer heeft op de berekende stijghoogte/grondwaterstand bij de rooilijn. Dit geldt zowel voor de horizontale als verticale celgrootte.
Randvoorwaarde grachtzijde	Constante stijghoogte gelijk aan grachtpeil (NAP -0,4 m) bij de perforaties/-uitstroomopeningen naar de gracht. (geen stroming door dichte delen van de kade).
Randvoorwaarde landzijde (rooilijn) q Q	Uniforme instroom aan de landzijde: 0,1 m/d 0,1 * H * B m^3/d
Doorlatendheid antropogene deklaag	Khor = 3 m/d Kver = 1 m/d Tenzij er doorlatendheidsproeven zijn uitgevoerd die anders uitwijzen
Rekenmethode	Volledig confined Stationair Geen infiltratie / wegzijging richting diepere ondergrond

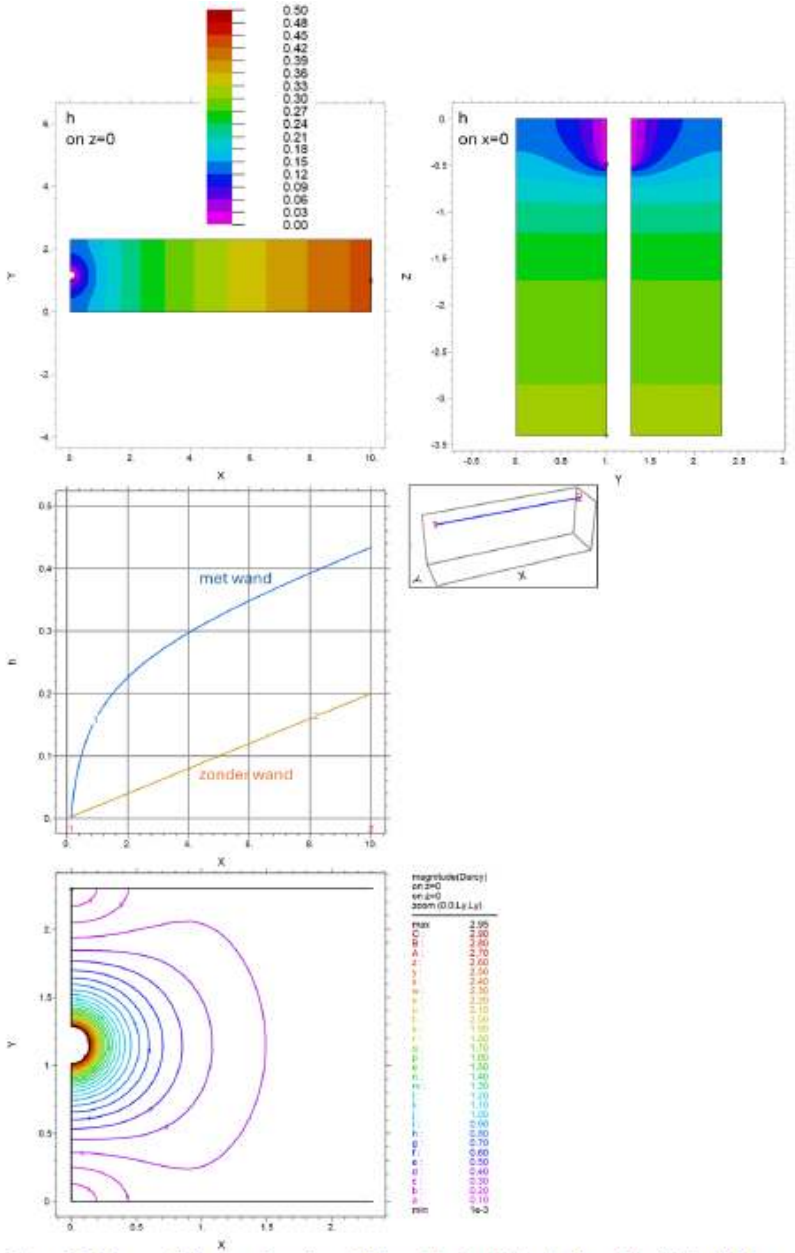
Voor de berekening dient er een klein, maar zeer verfijnd, grondwatermodel gemaakt te worden. In dit model wordt de (nieuwe) kadeconstructie zo verfijnd en gedetailleerd mogelijk ingebracht. Omdat het grondwatermodel maar enkele meters in afmeting hoeft te zijn, is een celgrootte in de orde van 0,01 m technisch uitvoerbaar.

Dichte delen van de kademuur worden gemodelleerd middels een ondoorlatende modelcel. Open delen van de nieuwe kademuur worden gemodelleerd met openingen tussen de ondoorlatende modelcellen. De kadeconstructie dient zo exact als mogelijk te worden geschematiseerd in het model.

De berekeningen worden uitgevoerd met een constante verzadigde dikte tot aan grachtpeil (confined). De keuze voor confined sluit het best aan het concept weerstand omdat er dan een enkelvoudige waarde is voor het (gemiddelde) specifieke debiet in het hele modeldomein. Om deze reden hoeft het bodemdeel boven grachtpeil niet meegenomen te worden.

Aan de rooilijnzijde wordt een specifiek debiet (q in m/d) opgelegd over de volledige modelhoogte en –breedte. Dit debiet is q=0,1 m/d. Voor een 3D-modflow model dient dit debiet omgezet te worden naar volumedebiet Q in m^3/d. Dit kan met de volgende formule: Q [m^3/d] = q [m/d] * breedte model [m] * hoogte model [m]. Waarbij q = 0,1 m/d. Dit betekent dat het opgelegde volumedebiet afhankelijk is van de modelbreedte en –hoogte.

Het grondwatermodel zal een verhang tussen de kademuur en rooilijn uitrekenen. Zie voorbeeldresultaten in figuur 1.



*Figuur 3-3 Rekenresultaten voor: **domein met buispaal**, k_x=5 m/d; k_z=1 m/d, q_{in}=0.1 m/d, h.o.h=2.3 m. Boven: stijghoogtecontourplots voor bovenzijde en grachtzijde. Midden: stijghoogteprofiel van de buispaal tot de rooilijn aan de bovenzijde. Onder: Contourplot van de grootte van het specifiek debiet in de omgeving van de buispaal aan de bovenzijde (in m/d).*

Figuur 1 Voorbeeld rekenresultaten (in dit voorbeeld is het grachtpeil als h = 0 m genomen)

3. Vertaling naar (kade)weerstand

De modelberekening geeft een grondwaterstandverschil tussen de gracht en de rooilijn.

De weerstand (kade + bodem) wordt bepaald met de volgende formule:
C_{totaal} [d] = dH / q
Waarbij:

- dH = grondwaterstandsverschil tussen gracht en rooilijn [m]
- q = 0,1 [m/d]

De bijdrage van de bodem (C_{bodem}) wordt berekend door de modelberekening opnieuw uit te voeren, maar dan zonder kadeconstructie.

De weerstand van de kadeconstructie wordt vervolgens bepaald door:
$C_{kade} = C_{totaal} - C_{bodem}$

4. Aandachtspunten

Voor de berekeningen geldt dat de resultaten afhankelijk zijn van de cel discretisatie. Hiervoor geldt dat naarmate er verfijnder wordt gerekend, de daadwerkelijke kadeweerstand asymptotisch wordt bereikt. Hoe verfijnder de berekening, hoe lager de weerstand. Een (te) grove cel discretisatie zal dus leiden tot een overschatting van de weerstand. Het project dient in de verdere toetsing uit te gaan van de berekende kadeweerstand. Dit geeft de uitdaging voor het project om de modellering zo verfijnd mogelijk uit te voeren. Dit geldt zowel voor de horizontale als verticale modeldiscretisatie.

Het debiet (Q in m^3/d) is afhankelijk van de modelbreedte en –hoogte.

In het verticale vlak kan de berekende stijghoogte variëren. Dit leidt tot verschillend grondwaterverhang en bijbehorende C. Echter verschilt hierbij zowel de C_{totaal} en C_{bodem}. Bij het toepassen van de formule $C_{kade} = C_{totaal} – C_{bodem}$ vallen deze verschillen grotendeels weg, en is C_{kade} nagenoeg gelijk. Het uitgangspunt is om de formules toe te passen voor een modelcel met het grootste grondwaterverhang.

Deze rekenmethode dient voor het berekenen van de kadeweerstand. Toetsing van de geohydrologische effecten op de omgeving dient met een groter grondwatermodel (bij voorkeur een eiland omringd door grachten) te gebeuren. De weerstand van de nieuwe kademuurconstructie C_{kade} wordt dan, middels een HFB, opgelegd op de nieuwe kademuur. Dit betekent dat het grotere grondwatermodel een grovere celdiscretisatie kan hebben.

De C_{kade} is mede afhankelijk van de doorlatendheid van de ophooglaag.